

文章编号: 1000-7598 (2013) 09-2576-08

垃圾体内部与衬里界面组合破坏稳定分析方法研究

施建勇, 栾金龙

(河海大学 教育部岩土力学与堤坝工程重点实验室, 南京 210098)

摘 要: 垃圾填埋场沿底坡和背坡衬里界面发生平移破坏的工程实例较多, 也有破坏面沿垃圾体内部和底坡的组合破坏形式, 相应的计算分析方法有待完善。对组合破坏, 根据垃圾体内部破坏面为库仑主动破坏面和组合破坏面上各点安全系数相同的假设, 由刚体极限平衡条件, 建立组合破坏的稳定计算方法。运用双楔体和组合破坏稳定分析方法对算例和 Kettleman Hills 填埋场工程实例进行计算分析。结果表明: 双楔体法计算得到的最危险平移滑动破坏安全系数大于组合破坏最小安全系数; 最危险破坏面是组合破坏面; 对 Kettleman Hills 填埋场, 组合滑动面也是可能的滑动破坏面。由此可见, 组合破坏是垃圾填埋场可能的破坏形式之一, 在进行垃圾填埋体滑动稳定分析计算时应进行组合破坏形式的计算分析。

关 键 词: 平移破坏; 组合破坏; 主动破坏面; 极限平衡; 计算方法

中图分类号: TU 433

文献标识码: A

Stability analysis method for composite failure through base liner and waste filling

SHI Jian-yong, LUAN Jin-long

(Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Dike Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: The translational failure along liner system at bottom and back slope often happened in municipal waste landfill. The composite failure through the body of waste filling and bottom slope is other failure mode. The relative calculation method of slope stability in landfill for composite failure mode must be modified based on the current stability analysis method. For composite failure, it is assumed that failure surface in waste filling is in Coulomb's active situation and safety factor is identical at all points on the composite failure surface. On the limit equilibrium of rigid body, a new stability analysis method for composite failure is presented. The stability of a slope and Kettleman Hills's landfill slope are calculated by the new method and two wedges method. The calculation results show that safety factor obtained by two wedges method for dangerous translational failure is higher than that by the above new method. The most dangerous slide failure surface is composite failure surface. For the Kettleman Hills's landfill, the composite failure surface is possible sliding failure surface. It can be found that the composite failure is one of the possible failure modes. The composite failure mode must be considered for slope stability safety analysis of landfill.

Key words: translational failure; composite failure; active failure surface; limit equilibrium; calculation method

1 引 言

在含有土工合成材料衬里的现代卫生填埋场中, 垃圾土边坡失稳破坏的主要型式是由衬里剪切强度控制的平移破坏^[1-2]; Qian 等^[3-4]在 2003 年利用极限平衡理论建立了一个新的填埋体双楔体平移破坏分析计算方法, 并先后进行了多次改进, 在 2009 年又做了进一步的拓展研究, 提出了利用垃圾坝增加填埋空间的三楔体平移破坏分析计算方法。

垃圾土边坡在沿衬里界面平移破坏时, 还会因施工过程、淋滤液水位等的变化产生破坏面在衬里结构内部的转移, 相应的转移规律和垃圾填埋体稳定分析研究也在不断完善之中^[5]。

在 20 世纪 60 年代, Sultan 等^[6]通过试验和计算分析发现, 土石堆体心墙坝最危险的滑动破坏面不是圆弧滑动法计算得到的圆柱面, 而是沿土石堆体与心墙界面、土石堆体内部的双平面, 由此提出了土石堆体心墙坝新的失稳模式和边坡稳定的楔体

收稿日期: 2012-06-30

基金项目: 国家自然科学基金资助(No. 41172234)。

第一作者简介: 施建勇, 男, 1965 年生, 博士, 教授, 主要从事城市卫生填埋方面的研究工作。E-mail: soft-ground@hhu.edu.cn

分析方法。类似的, 垃圾填埋体沿底坡和背坡衬里软弱界面滑动是已得到工程界认同的平移破坏形式, 而填埋体是否可能沿底坡衬里界面和垃圾填埋体内部形成的组合面破坏尚未进行研究, 见图 1。图中 CQ 是填埋场的衬里结构底坡, OQ 是填埋场的衬里结构背坡; 垃圾滑动体可能沿衬里结构 OQ 与 QC 面平移破坏, 也可能沿垃圾体内部的极限破坏面 AB 和填埋场的衬里结构底坡 CB 组合滑动破坏。破坏面在垃圾体内部的研究工作也已取得进展^[7-9], 但对填埋体的稳定分析主要侧重圆弧滑动破坏和双楔体极限平衡分析。

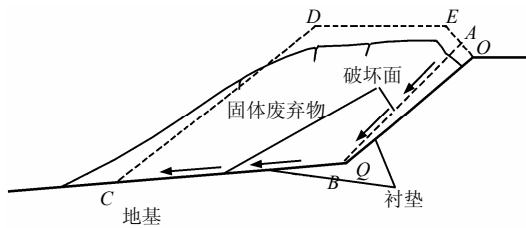


图1 组合滑动破坏示意图

Fig.1 Sketch of composite sliding failure

本文根据垃圾土边坡可能出现的组合破坏形式, 推导出组合破坏稳定计算公式, 对平移和组合破坏进行对比分析研究。

2 沿垃圾填埋体内部与衬里界面组合破坏稳定分析方法

由于垃圾填埋场破坏时, 失稳垃圾体会产生离开稳定垃圾体的位移, 且在失稳垃圾体与稳定垃圾体间出现张裂^[10]。破坏楔体的受力分析示意图如图 2 所示。

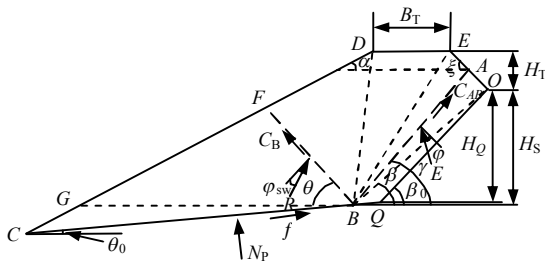


图2 组合破坏滑动楔体受力示意图

Fig.2 Force diagram of sliding wedge for composite failure

B 点为滑动楔体 $ABCDE$ 在底坡衬里面的起点, 过 B 点的水平线与 CD 的交点 G ; 坡顶 DE 的长度为 B_T , 背坡以上填埋体的高度为 H_T , 背坡坡顶到 B 处的高度为 H_S , 用 H 表示两者之和, 即 $H = H_T + H_S$, 背坡坡顶到 Q 处的高度为 H_Q ; α 、 ξ 分别为埋

体前后坡面与水平面的夹角, θ 为填埋体内部主动破坏面 BF 面与水平面的夹角, φ 为滑动破坏面 AB 面上的内摩擦角, γ 为 AB 与水平面的夹角。垃圾填埋体底坡与水平面的夹角为 θ_0 , 背坡与水平面的夹角为 β_0 , OB 与水平面的夹角为 β 。点 B 处于底坡 CQ 中间某一位置, 不妨设 $\lambda = |BQ|/|CQ|$, 则背坡坡顶到 B 处的高度 H_S 和 OB 与水平面的夹角 β 可表示成:

$$H_S = a\lambda \sin \alpha \sin \theta_0 + H_Q \quad (1)$$

其中:

$$a = \frac{B_T + H_T (\cot \alpha + \cot \xi) + H_Q (\cot \alpha - \cot \beta_0)}{\sin(\alpha - \theta_0)} \quad (2)$$

$$\beta = \arctan \frac{H_S}{a\lambda \sin \alpha \cos \theta_0 + H_Q \cot \beta_0} \quad (3)$$

则底坡上 BC 和 BG 的长度分别为

$$|BC| = \frac{B_T + H \cot \alpha + H_T \cot \xi - H_S \cot \beta}{\sin(\alpha - \theta_0)} \sin \alpha \quad (4)$$

$$|BG| = B_T + H \cot \alpha + H_T \cot \xi - H_S \cot \beta \quad (5)$$

假设: ①垃圾填埋场破坏面由沿场底衬里界面和垃圾体内部滑动破坏面组合而成; ②滑动楔体为 $ABCDE$, 垃圾体内部极限破坏面 BF 是库仑主动破坏面, AB 是滑动破坏面, 楔体 $ABFDE$ 产生库仑主动破坏 (见图 2); ③组合破坏面上各点的安全系数相同。

根据实际发生的垃圾土边坡破坏工程实例^[10-11], 在滑坡的坡顶有开裂, 破面有挤压隆起。由库仑主动破坏运动分析^[12-13], $ABFDE$ 为主动破坏楔体, 其受力分析见图 3。根据库仑主动土压力理论, 由图 3 中破坏楔体 $ABFDE$ 的受力平衡, 可得到滑动破坏面 AB 上的土压力为

$$E(\theta) = \left[W_1 \sin(\theta - \varphi_{sw}) - c_{sw} (|BF| + \Delta|BF|) \cos \varphi_{sw} + c(|AB| + \Delta|AB|) \cos(\theta + \gamma - \varphi_{sw}) \right] / \sin(\theta + \gamma - \varphi_{sw} - \varphi) \quad (6)$$

式中: W_1 为破坏楔体 $ABFDE$ 的重力; c_{sw} 为填埋垃圾体的凝聚力为; φ_{sw} 为内摩擦角; γ_{sw} 为重度; $\Delta|AB|$ 和 $\Delta|BF|$ 为主动破坏时垃圾体顶部拉裂长度; c 为滑动破坏面 AB 上的黏聚力; φ 为滑动破坏面 AB 上的内摩擦角, 计算分析时分别取为垃圾土的黏聚力和内摩擦角。

同样, 得到主动破坏面 BF 面上的支撑力为

$$R(\theta) = [E(\theta) \sin(\gamma - \varphi) + c_{sw}(|BF| + \Delta|BF|) \cos \theta - c(|AB| + \Delta|AB|) \cos \gamma] / \sin(\theta - \varphi_{sw}) \quad (7)$$

根据库仑主动土压力理论, 在 θ 角从 0° 到 $(180^\circ - \beta)$ 变动的过程中, 得到 $E(\theta)$ 的最大值 $E_{\max}$ 即为滑动破坏面 AB 面上的土压力。

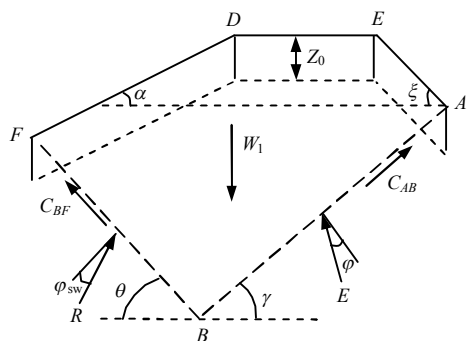


图3 主动破坏楔体受力示意图

Fig.3 Force diagram on active failure wedge

滑动破坏面 AB 上的安全系数为 $F_s(\gamma)$, 即摩擦力和黏聚力只有 $1/F_s(\gamma)$ 得到发挥。由图 2 滑动楔体 $ABCDE$ 的受力情况, 可以得到衬里滑动面 BC 上的法向应力为

$$N_p = W \cos \theta_0 - E \sin(\gamma - \theta_0) \sin \varphi / F_s(\gamma) - E \cos(\gamma - \theta_0) \cos \varphi - c / F_s(\gamma) \cdot (|AB| + \Delta|AB|) \sin(\gamma - \theta_0) \quad (8)$$

式中: W 为滑动楔体 $ABCD$ 的重力。

衬里滑动面 BC 上抗滑力为

$$F = N_p \tan \varphi_{BC} + c_{BC} |BC| \quad (9)$$

式中: N_p 为底部衬里界面总法向力; c_{BC} 为底部衬里界面的黏聚力; φ_{BC} 为底部衬里界面的摩擦角。

楔体 $ABCDE$ 的滑动力为

$$S = W \sin \theta_0 + E \sin(\gamma - \theta_0) \cos \varphi - E \cos(\gamma - \theta_0) \sin \varphi / F_s(\gamma) - c / F_s(\gamma) \cdot (|AB| + \Delta|AB|) \cos(\gamma - \theta_0) \quad (10)$$

由于滑动破坏面上的安全系数相同, 衬里滑动面上的安全系数可表示为

$$F_s(\gamma) = \{c_{BC} |BC| + \tan \varphi_{BC} [W \cos \theta_0 - E \sin(\gamma - \theta_0) \sin \varphi / F_s(\gamma) - E \cos(\gamma - \theta_0) \cos \varphi - c / F_s(\gamma) \cdot (|AB| + \Delta|AB|) \sin(\gamma - \theta_0)]\} / [W \sin \theta_0 + E \sin(\gamma - \theta_0) \cos \varphi - E \cos(\gamma - \theta_0) \sin \varphi / F_s(\gamma) - c / F_s(\gamma) \cdot (|AB| + \Delta|AB|) \cos(\gamma - \theta_0)] \quad (11)$$

安全系数表达式 (11) 实际上是一个以安全系数 $F_s(\gamma)$ 为未知数的方程, 求解其方程即可得到 $F_s(\gamma)$ 。当 γ 角在 β 角到 90° 范围内变动时, 取得最小 $F_s(\gamma)$ 时对应的 γ 角即为最不利破坏面的倾斜角, 对应的破坏面 AB 即为可能的滑动破坏面。实际计算时, 先选取 $\lambda = |BQ|/|CQ|$, 得到 β 角, 在某一 γ 值下, 计算滑动破坏面 AB 面上的土压力, 由式 (10) 试算得到安全系数; γ 在 β 到 90° 范围内变动时, 计算得到最小安全系数; 改变 λ , 重复上述计算, 得到整个滑动楔体的最小安全系数。

垃圾体达到主动极限状态时, 会在一定深度范围内产生拉裂缝, 拉裂区深度 Z_0 为^[12]

$$Z_0 = \frac{2c_{sw}}{\gamma_{sw} |\tan(45^\circ - \varphi_{sw} / 2)|} \quad (12)$$

关于滑动楔体的重力 W , 分别就以下 3 种不同类型进行计算。

(1) 类型 1 (见图 4): $H_s / \tan \beta > B_T + H_T / \tan \xi$

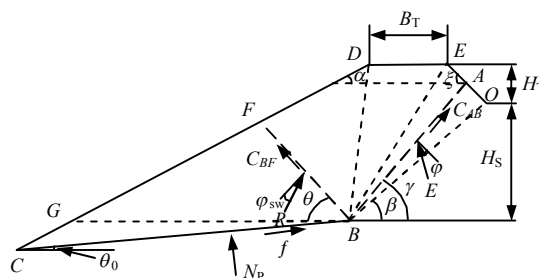


图4 类型 1: $H_s / \tan \beta > B_T + H_T / \tan \xi$

Fig.4 Type 1: $H_s / \tan \beta > B_T + H_T / \tan \xi$

①当 $\tan \beta \leq \tan \gamma < \frac{H}{H_s \cot \beta - H_T \cot \xi}$, 即 A 点在 EO 上时, 有

在 EO 上时, 有

$$W = \gamma_{sw} S_{ABCDE} = \gamma_{sw} \left\{ \frac{|BC| |BG|}{2} \sin \theta_0 + \frac{H}{2} [2B_T + H(\cot \alpha + \cot \xi)] - \frac{[H_s(\cot \beta + \cot \xi)]^2}{2(\cot \gamma + \cot \xi)} \right\} \quad (13)$$

极限破坏面的长度 $|AB|$ 和开裂区的长度 $\Delta|AB|$ 分别为

$$|AB| = \frac{H_s(\cot \beta + \cot \xi)}{(\cot \gamma + \cot \xi) \sin \gamma} \quad (14)$$

$$\Delta|AB| = -\frac{\cos \xi}{\sin(\gamma + \xi)} Z_0 \quad (15)$$

填埋体本身的力学和几何特性如下：垃圾土的重度 $\gamma_{sw} = 10.20 \text{ kN/m}^3$ ，内摩擦角 $\varphi_{sw} = 30^\circ$ ，黏聚力 $c_{sw} = 3.0 \text{ kPa}$ ，填埋体前坡坡角 $\alpha = 15.9^\circ$ ，背坡坡角 $\beta_0 = 18.4^\circ$ ，底坡坡角 $\theta_0 = 1.1^\circ$ ，顶部的宽度 $B_T = 25 \text{ m}$ ，背部边坡高度 $H_Q = 50 \text{ m}$ ，背坡坡顶以上的高度 $H_T = 15 \text{ m}$ ，背坡坡顶以上垃圾堆体的坡角 $\xi = 14.0^\circ$ 。图 2 所示典型断面双楔体平移破坏稳定和组合破坏计算结果对比见表 2。

表 2 两种计算方法分析结果对比

Table 2 Comparison of results by two calculation methods

底部衬垫 界面编号	文献[4]背部衬 垫界面 IV 的 F_s	组合破坏分析方法		
		λ	$\gamma/(^\circ)$	F_s
I	1.867	0.01	30.0	1.558
II	1.571	0.01	30.0	1.370
III	1.388	0.01	30.0	1.351
IV	1.433	0.01	30.0	1.443
V	1.579	0.01	30.0	1.421
VI	1.571	0.01	30.0	1.370
VII	1.414	0.01	30.0	1.351
VIII	2.091	0.01	30.0	1.665

表 2 表明，文献[4]利用双楔体法计算得到的最危险滑动面为底坡界面 III 与背坡界面 IV，相应的平移破坏滑动稳定安全系数为 1.388；滑动面为穿过垃圾体内部和底坡界面 III 的组合破坏面，稳定安全系数为 1.351，小于平移破坏计算结果，实际破坏面有沿垃圾填埋场底坡衬垫界面和垃圾体内部组合破坏的可能，破坏面位置如图 7 所示。在进行垃圾体的滑动稳定分析时，除了要进行沿衬垫界面平移破坏稳定分析外，还需要进行沿垃圾填埋场底坡衬垫界面和垃圾体内部组合破坏的稳定分析。

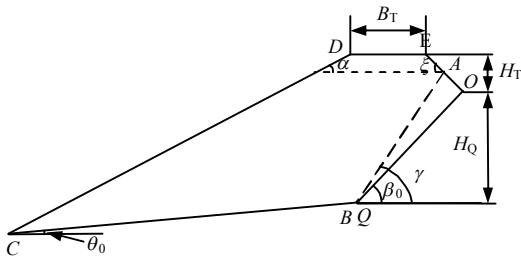


图 7 组合破坏滑动破坏面示意图
Fig.7 Sketch of composite sliding failure surface

由表 2 可见，组合破坏分析得到的 $\lambda = 0.01$ ，实际可能的组合破坏面通过整个底坡，垃圾体内部的破坏面起点 B 在底坡与背坡交点 Q 点处，破坏面 AB 与水平面呈 $\gamma = 30.0^\circ$ 角。

3.2 美国 Kettleman Hills 填埋场失稳破坏分析

Kettleman Hills 填埋场于 1988 年 3 月 19 日因压实黏土固结排出的水弱化了其与土工膜界面的强度而发生失稳破坏^[11]，填埋断面以及衬里结构见图 8，衬里界面强度特性参数见表 3。

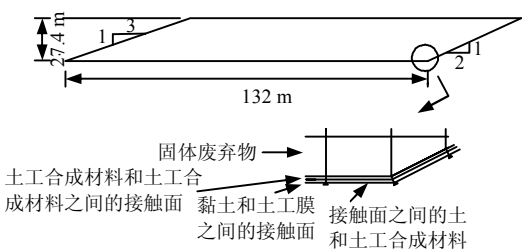


图 8 Kettleman Hills 填埋场破坏前的断面图
Fig.8 Section of Kettleman Hills landfill before failure

由表 3 可见，土工布与土工膜界面的强度参数最低，是最有可能的滑动面位置。

表 3 Kettleman Hills 填埋场衬里界面剪切强度参数

Table 3 Parameters of shear strength on liner interface of Kettleman Hills landfill

界面名称	峰值强度		残余强度	
	$\delta_F/(^\circ)$	c_F/kPa	$\delta_A/(^\circ)$	c_A/kPa
垃圾与土工膜 I	26.0	72	14.0	40
土工布与土工膜 II	11.0	0	6.5	0
黏土与土工膜 III	26.8	143	18.4	76

填埋垃圾的强度参数^[11]：黏聚力为 10 kPa，内摩擦角为 38° 。

破坏面通过底坡 II 和背坡 II 的平移破坏、组合破坏计算结果对比见表 4。

表 4 Kettleman Hills 填埋场两种方法分析结果对比

Table 4 Comparison of results by two calculation methods of Kettleman Hills landfill

位置	平移破坏分析方法的 F_s			组合破坏分析方法		
	背部	(II)峰值	(II)残余	λ	$\gamma /(^{\circ})$	F_s
底部	(II)峰值	1.89	1.72	0.5	40.1	3.53
衬里	(II)残余	1.25	1.08	0.5	40.1	2.27

由表 4 可见，采用双楔体平移破坏分析，在底坡和背坡衬里界面均取峰值强度时得到的安全系数，其值为 1.89；底坡和背坡衬里界面均取残余强度时的安全系数，其值为 1.08，接近极限状态；组合破坏对应的安全系数分别为 3.53 和 2.27；平移破坏计算得到的安全系数较小。

由于垃圾填埋场衬里结构中光面 HDPE 膜界面

摩擦性能较差,现在一般选用糙面 HDPE 膜。根据 Koerner 和 Narejo 的试验结果^[14],糙面 HDPE 膜与土工布界面的峰值强度参数如下:黏聚力为 8 kPa,内摩擦角为 25°;残余强度参数如下:黏聚力为 0 kPa,内摩擦角为 17°。由平移破坏分析方法计算得到安全系数分别为:4.587(底坡峰值-背坡峰值)、3.307(底坡残余值-背坡峰值)、4.164(底坡峰值-背坡残余值)、2.896(底坡残余值-背坡残余值),大于组合破坏分析方法计算得到安全系数。

沿垃圾体和底坡组合破坏最危险滑动面位置见图 9。

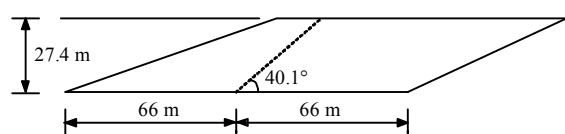


图 9 组合破坏最危险滑动面

Fig.9 Most dangerous combined sliding failure surface

由图可见,组合破坏最危险滑动面起点在底坡的中间位置,与底坡成 40.1°角。尽管组合滑动面不是 Kettleman Hills 填埋场最危险滑动面,但可能的滑动面,类似地破坏曾经发生过^[15]。

以上分析表明:极限平衡分析方法是边坡稳定分析的可靠方法;组合破坏是垃圾填埋场可能的破坏形式之一,在进行沿衬里界面平移破坏分析计算的同时也需要进行组合破坏的分析,以确定最危险的滑动破坏形式。

4 结 语

根据破坏面沿垃圾体内部和底坡的组合破坏形式,假设垃圾体内部破坏面为库仑主动破坏面和组合破坏面上各点的安全系数相同,提出组合破坏的稳定计算方法,对 4 种不同的几何位置,给出了相应的滑动体重量计算方法,经过迭代试算得到组合破坏的稳定安全系数。在算例中,双楔体法计算得到的最危险平移滑动破坏安全系数为 1.388,对应的最危险组合破坏安全系数为 1.351,组合破坏更容易发生。对 Kettleman hills 填埋场,破坏面沿通过垃圾体内与水平底坡成 40.1°的面和底坡衬里界面形成的组合破坏面,是最危险滑动面。因此,平移破坏是含复合衬里结构垃圾填埋场的主要破坏形式,组合破坏是垃圾填埋场重要的破坏形式,在进行垃圾填埋体滑动稳定分析计算时需要加强组合破坏的计算分析。

本文的计算方法是在假设通过垃圾体内部破坏面为平面的基础上得到,实际工程中的内部破坏面多为曲面,相应的计算方法还需要做进一步的研究。

参 考 文 献

- [1] QIAN XUEDE, KOERNER R M, GRAY D H. Geotechnical aspects of landfill design and construction[M]. New Jersey: Prentice Hall Inc., 2002.
- [2] KOERNER R M, SOONG T Y. "Stability assessment of ten large landfill failures", advances in transportation and geoenvironmental systems using geosynthetics[C]// Proceedings of Sessions of Geodenvver 2000. [S. l.]: ASCE Geotechnical Special Publication, 2000: 1—38.
- [3] QIAN XUEDE, KOERNER R M, GRAY D H. Translational failure analysis of landfills[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 2003, 129(6): 506—519.
- [4] QIAN XUEDE, KOERNER R M. Stability analysis for using engineered berm to increase landfill space[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 2009, 135(8): 1082—1091.
- [5] 钱学德, 施建勇. 关于具有多层复合衬里填埋场稳定安全的探讨[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(11): 1676—1682.
QIAN Xue-de, SHI Jian-yong. Stability problems for landfills with multilayer geosynthetic liner system[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2011, 33(11): 1676—1682.
- [6] SULTAN H, SEED B. Stability of sloping core earth dams[J]. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 1967, 93(SM4): 45—67.
- [7] 陈云敏, 王立忠, 胡亚元, 等. 城市固体垃圾填埋场边坡稳定分析[J]. 土木工程学报, 2000, 33(3): 92—97.
CHEN Yun-min, WANG Li-zhong, HU Ya-yuan, et al. Stability analysis of solid waste landfill slope[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2000, 33(3): 92—97.
- [8] 朱向荣, 王朝晖, 方鹏飞, 等. 杭州天子岭垃圾填埋场扩容可行性研究[J]. 岩土工程学报, 2002, 24(3): 281—285.
ZHU Xiang-rong, WANG Zhao-hui, FANG Peng-fei, et al. Study on feasibility of enlarging capacity in Tianziling waste landfill[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2002, 24(3): 281—285.